

**А. И. Косаченко**  
**А. И. Котюсов**  
**Д. А. Касанов**  
**А. С. Гашкова**  
**Ю. Г. Павлов**

*Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина  
Екатеринбург, Россия*

## **ПУПИЛЛОМЕТРИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОГНИТИВНОЙ ПЕРЕГРУЗКИ**

В работе представлены результаты исследования трех физиологических маркеров когнитивной перегрузки: диаметр зрачка, мощность альфа- и тета-ритмов, а также поведенческие (успешность запоминания) показатели когнитивной перегрузки.

*Ключевые слова:* когнитивная перегрузка, рабочая память, пупиллометрия, ЭЭГ.

**Alexandra. I. Kosachenko**  
**Alexander. I. Kotyusov**  
**Dauren. A. Kasanov**  
**Anastasia. S. Gashkova**  
**Yuri. G. Pavlov**

*Ural Federal University named  
after the first President of Russia B. N. Yeltsin  
Yekaterinburg, Russia*

## **PUPILLOMETRIC AND ELECTROENCEPHALOGRAPHIC STUDY OF COGNITIVE OVERLOAD**

This study presents such physiological markers of cognitive overload as pupil diameter, the power of alpha and theta rhythms, as well as its behavioral (successful memorization) indicators.

*Keywords:* cognitive overload, working memory, pupillometry, EEG.

*Введение.* В 1974 году Peavler [1] в задаче на запоминание рядов цифр разной длины (digit span task) показал, что размер зрачка достигает асимптоты при нагрузке рабочей памяти семью элементами, даже при предъявлении ряда из 13 цифр, запоминание которого вызывает когнитивную перегрузку. Однако в 1996 году Granholm и соавт. [2] обнаружили, что задача запоминания 13 цифр сопровождается резким уменьшением диаметра зрачка до размера, записанного в фоне (baseline) после достижения пика на уровне около 7 цифр.

*Материалы и методы.* В большинстве предыдущих психофизиологических исследований нагрузка на вербальную рабочую память лежала в узком диапазоне, в среднем от 1 до 6 элементов, но не превышала 10 элементов [3]. Неясно, как мозг реагирует на нагрузку, превышающую нормальный объем рабочей памяти человека. Поэтому целью нашей работы стало не только разрешение противоречий в данных о поведении зрачка при наступлении когнитивной перегрузки, но и изучение этого феномена с помощью ЭЭГ и пупиллометрии.

*Результаты.* Было показано, что с увеличением длины ряда количество правильно воспроизведенных цифр убывает ( $M \pm SD$ ; 4,49  $\pm$  0,7, 3,48  $\pm$  0,63, 2,72  $\pm$  0,64 цифры в условиях запоминания 5, 9 и 13 цифр). Эффект влияния экспериментального условия на количество правильно воспроизведенных цифр был статистически значим ( $F(2, 164) = 150.83, p < .001, \eta^2 = .65$ ).

Анализ пупиллометрии показал, что полученные нами результаты согласуются с результатами, представленными в работе Granholm et al.: в случае предъявления 13 цифр диаметр зрачка достигал пика на 7-й цифре, а затем начинал уменьшаться после предъявления 9-й цифры, достигая исходного размера на этапе воспроизведения участником услышанного ряда [2].

Анализ ЭЭГ данных был проведен для среднелобного тета-ритма в отведении Fz и теменно-затылочного альфа-ритма в отведении Pz. Как следует из обзора нейрофизиологических исследований рабочей памяти [3], тета-ритм является наиболее воспроизводимым маркером нагрузки на вербальную рабочую память. Было получено, что тета-активность, схожим образом с диаметром

зрочка, после достижения пика примерно на 7-й цифре начинала снижать свое значение после нагрузки в девять цифр, хотя так и не достигла исходного уровня. Эти наблюдения подтверждаются значимым эффектом когнитивной нагрузки ( $F(2, 128) = 23,35, p < 0,001, \eta^2 = 0,27$ ).

Анализ активности альфа-ритма показал другой паттерн изменения: наблюдалось увеличение его мощности при первых трех элементах, после чего альфа-активность начинала снижаться. Был обнаружен статистически значимый эффект нагрузки с 4 по 13 цифру в задаче на запоминание ( $F(2, 100) = 24,19, p < .001, \eta^2 = .27$ ). При этом можно значимо выделить два уровня нагрузки: средний (запоминание 6, 7, 8 и 9 цифр) и высокий (запоминание 10, 11, 12 и 13 цифр).

В качестве одного из нейромаркеров когнитивной нагрузки был использован компонент вызванных потенциалов P300 (P3b). Амплитуда P300 уменьшалась при увеличении нагрузки на рабочую память вплоть до достижения минимального значения на уровне в семь цифр и далее выходила на плато (эффект когнитивной нагрузки  $F(2, 111) = 11,92, p < 0,001, \eta^2 = 0,16$ ).

Также были обнаружены значимые корреляции между успешностью выполнения задачи и размером зрочка, альфа-мощностью в условии запоминания, равные 0,27 и -0,35 соответственно. Важно отметить, что тета и размер зрочка также коррелировали ( $\rho = 0,36, p < 0,001$ ), в отличие от альфа и размера зрочка ( $\rho = -0,12$ ).

Анализ факторизации переменных позволяет сделать следующие выводы. Объем рабочей памяти в разных тестах выделяется в один фактор (второй). Кроме того, этот фактор включает в себя и тест антисаккад, связанный с функционированием когнитивного контроля. Первый фактор может быть связан как со скоростью обработки информации, так и с эффективностью работы селективного внимания. Отрицательная связь первого фактора со вторым, который можно назвать «фактором рабочей памяти», показывает вклад селективного внимания в функционирование рабочей памяти.

*Заключение.* Наши результаты демонстрируют диссоциацию между физиологическими коррелятами когнитивной нагрузки.

Тета-активность и диаметр зрачка снижают свое значение после достижения пика примерно на уровне в семь цифр. При этом альфа-активность и амплитуда P300 при достижении ожидаемого эффекта перегрузки выходят на плато.

Вероятно, альфа-ритм отражает процессы распределения внимания. При достижении определенного порога дальнейшее дробление ограниченных ресурсов внимания становится невозможным и уровень параметра приходит к стабильному состоянию. В то же время когнитивные усилия, затрачиваемые на кодирование и удержание информации в памяти, снижаются при достижении пиковой нагрузки, т. к., как можно предположить из словесных отчетов испытуемых, при субъективном достижении состояния когнитивной перегрузки испытуемые переходили от стратегии «запомнить все» к стратегии «запомнить хотя бы несколько первых цифр». В таком случае возможно, что при достижении пика усилия по удержанию внимания и поддержанию следа памяти истощаются и корреляты этих процессов — диаметр зрачка и мощность среднелобного тета-ритма — переходят к планомерному снижению.

### **Библиографические ссылки**

1. *Peavler W. S.* Pupil size, information overload, and performance differences // *Psychophysiology*. 1974. Vol. 11, № 5. P. 559–566.
2. *Pupillary responses index cognitive resource limitations / E. Granholm et al.* // *Psychophysiology*. 1996. Vol. 33, № 4. P. 457–461.
3. *Pavlov Y. G., Kotchoubey B.* Oscillatory brain activity and maintenance of verbal and visual working memory: A systematic review // *Psychophysiology*. 2020. P. e13735.

**Д. Г. Костанян  
О. В. Сысоева**

*Научный центр когнитивных исследований  
Научно-технологический университет «Сириус»  
Сочи, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ СЛУХОВОЙ СТИМУЛЯЦИИ НА РАЗЛИЧЕНИЕ СТИМУЛОВ НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКОМ И ПОВЕДЕНЧЕСКОМ УРОВНЯХ**

Рассматривалось влияние тетанизации на физиологические и поведенческие показатели. Блоки oddball, содержащие стандартный стимул (1 000 Гц) и два девиантных стимула (1 020 и 980 Гц) предъявлялись до и после тетанизирующего блока (предъявление одного из девиантных тонов (1 020 Гц) каждые 75 мс в течение 2 минут). Компонент вызванного потенциала MMN на тетанизированный и нететанизированный тон, стал различаться после тетанизации, хоть и не различался до нее. Хотя среднее значение MMN коррелировала со способностью различать тона, улучшение различительной способности на поведенческом уровне после тетанизации не было обнаружено.

*Ключевые слова:* LTP, слуховые вызванные потенциалы, MMN, тетанизации, способность различать слуховые стимулы.

**Daria G. Kostanyan  
Olga V. Sysoeva**

*Scientific Center for Cognitive Research  
Sirius University of Science and Technology  
Sochi, Russia*

## **THE EFFECT OF AUDITORY STIMULATION ON THE DIFFERENTIATION OF STIMULI AT THE PHYSIOLOGICAL AND BEHAVIORAL LEVELS**

The effect of tetanization on physiological and behavioral processes was considered. Oddball blocks with the standard stimulus (1 000 Hz) and two deviant stimuli (1 020 and 980 Hz) were presented before and after the tetanizing block (presentation of one of the deviant tones (1 020 Hz) every 75 ms, during 2 minutes). The MMN component in response to the tetanized

and non-tetanized tone became different after tetanization, even though it did not differ before tetanization. The mean MMN value correlated with discriminability in a psychophysical task, but the behavioral improvement after tetanization was not detected.

*Keywords:* LTP, auditory evoked potentials, MMN, tetanizations, auditory discriminability.

*Введение.* Изменения в нервной системе, происходящие под воздействием внешних стимулов, являются базовой основой научения и памяти. Одной из форм такого изменения является долговременная потенциация (LTP), заключающаяся в усилении синаптической связи при воздействии повторяющийся стимуляции [3]. Пластичность синаптических связей может быть важной основой изменения сенсорных процессов, а именно повышения чувствительности и различительной способности. Одним из способов неинвазивной оценки нейрофизиологических изменений могут служить сенсорные вызванные потенциалы. Так, некоторые их компоненты (например, MMN, отражающий реакцию на отличающийся стимул [6]) имеют свойство изменяться под воздействием сенсорной стимуляции [2, 4, 5]. Однако не всех работах удавалось воспроизвести увеличение MMN после тетанизации [1]. Задачей нашего исследования было оценить, как последствия слуховой LTP-подобная отражаются на уровне компонентов вызванных потенциалов (в частности MMN) и на способности различать слуховые стимулы на поведенческом уровне.

*Материалы и методы.* В исследовании приняли участие 27 здоровых участников (11 мужчин, средний возраст  $23,3 \pm 5,6$  лет). В качестве стимулов использовались тоны трех частот: 1 020 Гц, 1 000 Гц и 980 Гц. (Длительность 50 мс, громкость — 75 дБ, интервал между стимулами — 400 мс.) Стимулы предъявлялись в соответствии с oddball-парадигмой. Стандартные тоны 1 000 Гц перемежались двумя девиантами 1 020 Гц и 980 Гц, предъявляемыми с вероятностью 10 или 5 % каждый. Всего предъявлялось два oddball-блока (до и после тетанизации). LTP-подобная стимуляция (тетанизация) длилась 2 минуты и состояла из тона 1 020 Гц, подаваемого каждые

75 мс. Во время предъявления звуков участники смотрели видео с выключенным звуком.

Также в исследовании было два психофизических блока (до и после тетанизации), ставящих задачу обнаружить различия между двумя тонами в предъявляемой паре (два стандартных 1 000 Гц, стандартный 1 000 Гц и девиантный 980 Гц, или стандартный 1 000 Гц и девиантный 1 020 Гц). Каждая из возможных пар предъявлялась пять раз. В качестве меры способности к различению сигналов использовался критерий *argime*.

Запись ЭЭГ проводилась с использованием 128-каналов с помощью установки actiCHamp Plus (Brain Products GmbH). Обработка ЭЭГ проводилась в программе MNE Python. Данные были сегментированы на эпохи от 100 мс до начала стимула и 450 мс после него. Эпохи усреднялись отдельно по каждому типу стимула.

Амплитуда MMN оценивалась по разностной волне, рассчитанной путем вычитания вызванных потенциалов на стандартные тоны (1 000 Гц) из потенциалов на девиантные тоны (980 Гц или 1 020 Гц). Амплитуды MMN рассчитывались по получившимся разностным волнам как среднее значение в интервале 100–250 мс после предъявления стимула.

Для оценки различий компонента MMN в зависимости от типа стимула (тетанизированный 1 020 Гц или нететанизированный 980 Гц) и условия (до и после тетанизации) использовался дисперсионный анализ с повторными измерениями (ANOVA). Для изучения взаимосвязи между нейрофизиологическими и поведенческими показателями рассматривалась корреляция Пирсона.

*Результаты.* Для амплитуды MMN во фронтальных отведениях было выявлено значимое взаимодействие факторов тетанизации и типа стимула ( $F(1,24) = 5,127$ ;  $p = 0,033$ ). Последующий Post-hoc анализ показал, что MMN в ответ на тетанизированный тон (1 020 Гц) не отличались от MMN на нететанизированный тон (980 Гц) до тетанизации ( $p = 0,161$ ), но значительно возрос после тетанизации ( $p = 0,035$ ). Результаты психофизических блоков показали, что в целом участники были способны различать предъявляемые тона (*argime* > 0,5). При сопоставлении физиологических и психофизических данных не было видно изменений в способности

к дискриминации после тетанизации. Однако значимая корреляция была обнаружена при рассмотрении среднего значения ММН и среднего значения *aritime*. Таким образом, влияние тетанизации на поведенческие показатели очень слабое.

*Заключение.* Были показаны нейрофизиологические изменения, вызванные кратковременной слуховой тетанизацией, которые предположительно связаны с долговременной потенциацией (LTP). Быстрая слуховая стимуляция не только увеличивает компонент ММН, делая его больше для тетанизованного (1 020 Гц), чем нететанизованного (980 Гц) звука, но и ослабляет ММН в ответ на нететанизованный звук соседней частоты (980 Гц). Однако на поведенческом уровне значительного изменения в способности различать после тетанизации обнаружено не было.

#### **Библиографические ссылки**

1. Влияние слуховой LTP-подобной стимуляции на обработку звуковых стимулов / А. Б. Ребрейкина и др. // Сенсорные системы. 2021. № 2 (35). С. 144–152.
2. Induction of LTP in the human auditory cortex by sensory stimulation / W. C. Clapp et al. // European Journal of Neuroscience. 2005. № 5 (22). P. 1135–1140.
3. Rapid visual stimulation induces N-methyl-D-aspartate receptor-dependent sensory long-term potentiation in the rat cortex / W. C. Clapp et al. // NeuroReport. 2006. № 5 (17). P. 511–515.
4. *Kompus K.* Westerhausen Increased MMN amplitude following passive perceptual learning with LTP-like rapid stimulation // Neuroscience Letters. 2018. (666). P. 28–31.
5. A method to induce human cortical long-term potentiation by acoustic stimulation / G. Lei et al. // Acta Oto-Laryngologica. 2017. № 10 (137). P. 1069–1076.
6. Development of a memory trace for a complex sound in the human brain / R. Näätänen et al. // NeuroReport. 1993. № 5 (4). P. 503–506.